第1章

加速度センサ，角速度センサのしくみ

用途によって求められる応答速度や検出範囲が変わるセンサを適材適所に使いこなす

上田智章

ゲーム機に搭載されたことで注目が集まっている加速度センサと角速度センサだが，両者の違いを説明できる人は多くないだろう．これらのセンサの動作原理は全く異なる．ここでは，それぞれの動作のしくみや応用例について解説する．（編集部）

加速度センサや角速度センサというと，一体どんな機器に組み込まれているのかピンとこない人が多いかもしれません．身近なところでは，自動車のカー・ナビゲーション・システムやエアバッグ，手ぶれ補正機能の付いたビデオ・カメラやデジタル・スチル・カメラ，ゲーム機のコントローラなど，実に多くの機器に組み込まれています．

加速度センサや角速度センサ自体は，かなり以前からありましたが，これほどまでに普及したのは，近年になって発達したMEMS（micro electro mechanical systems）技術のおかげです．MEMSは半導体製造技術を用いて，1枚のシリコン・ウェハ上に機械的な機構と集積化した電子回路を一体化した機能デバイスです．

写真1に米国Analog Devices社の加速度センサの内部を示します．MEMS技術を使うと小型軽量化，高精度化，広帯域特性，低価格を一度に実現できます．角速度センサや加速度センサはMEMS技術応用デバイスの代表格といえます．

● 加速度センサと角速度センサの特徴

加速度センサは，センサ自体の加速度，つまり1s（秒）当たりの速度の変化を検出するセンサです．重力加速度も検
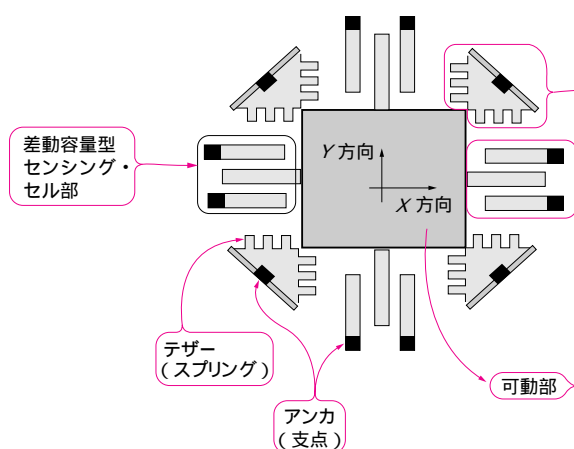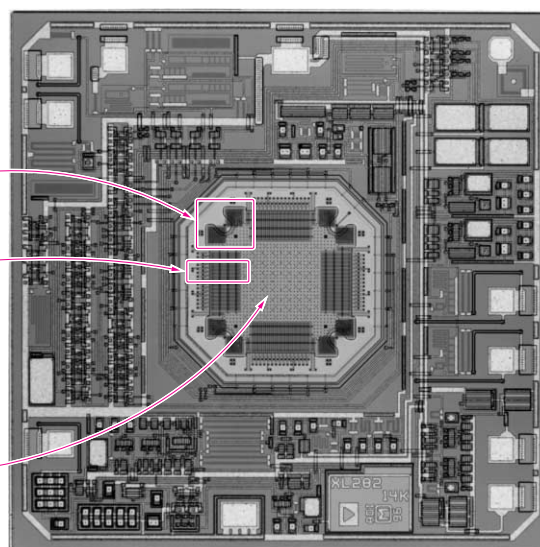
写真1[1]
Analog Devices社の加速度センサ（ADXLシリーズ）の構造

（a）センサ部の構造

（b）内部構造

KeyWord
MEMS，micro electro mechanical systems，ひずみゲージ，圧電素子，静電容量，ADXLシリーズ，PWM，ジャイロスコープ，ADXRS150，ADXL330

出できるので，人や物体の動きや地震などの振動を検出できます．3軸加速度センサであれば，水平状態も検出できます．

角速度センサは，基準軸に対して物体が1s間に何度の回転運動をしているのかを検出するセンサです．別名ジャイロ・センサと呼ばれています．これは初期の角速度センサがジャイロスコープと呼ばれたことに由来しています．

● 加速度センサの動作原理と種類

加速度センサは図1に示すように，ばね定数kのばねに支えられた質量mのおもりを使って，ばねの変位量xを基に加速度aを検出するセンサです．つまり，$kx = ma$が成立するので，$a = kx/m$と置き換えることで加速度aを検出できます．kとmは既知なので，xが分かれば加速度が求まります．

この変位量xを計測する方式には，ひずみゲージ，圧電素子，あるいは静電容量を計測する3方式があります．ただし，ばねを使ったセンサは周波数f[Hz]が，

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

で共振する性質があるため，おもりの重さを小さくしないと高い応答特性が得られません．

MEMS技術を用いて小さく作ることでこれを解決し，2kHz程度の周波数応答特性を実現しました．Analog Devices社の静電容量方式「ADXLシリーズ」の場合，写真1や図2に示されるように，おもりの側面にくし状のコンデンサが形成されており，電子回路により静電容量の変化を加速度に対応する電気信号に変換しています．

製品化されているほとんどの加速度センサはアナログ出力であり，少数の外付け部品だけでA-Dコンバータに接続できます．PWM(pulse width modulation)出力のタイプもありますが，タイマ・カウンタでパルス幅を検出する回路を用意しなくても，LPF(low-pass filter)を通してキャリア周波数をカットすれば，アナログ量が簡単に取り出せます．抵抗(R)とコンデンサ(C)だけの簡単なフィルタでもアナログ量に変換できます．

直接シリアル・インターフェース(SPI)に直結できるように工夫された品種も登場しています．大別すると測定レンジが±20g以下の汎用計測用と，±20g～±250gの衝突衝撃検出用があります(g = 9.8m/s^2)．

● 角速度センサの動作原理と種類

角速度センサは力学的な慣性を利用する品種と光学的な干渉を利用する品種に大別されます．

▶ ジャイロスコープ(gyroscope)

ジャイロスコープは，いわゆる「地球ゴマ」が組み込まれた大掛かりな装置で，回転している物体はその回転状態を維持し，いつも同じ方向を向く「回転慣性力」を利用しています．コマが大きく重いほど高精度であるため，以前は船舶や航空機の慣性航法システムに採用されてきました．

ジャイロスコープには起動時間が長いという欠点やベアリングの摩耗などといったメンテナンスの問題があります．

▶ 光ファイバ・ジャイロ(fiber optic gyro)

シングル・モード光ファイバをリング状に巻いて，それぞれの端面にレーザ光を分離して入射し，リングに角速度が与えられると分離された光に光路差が生じます(サニャッ

図1　3軸加速度センサの検出原理
ばね定数kのばねに支えられた質量mのおもりを使って，ばねの変位量xを基に加速度aを検出する．
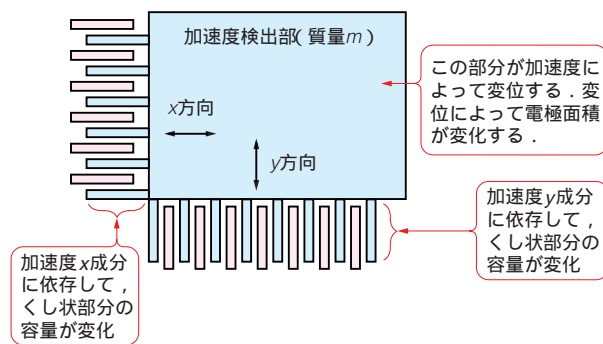
図2　Analog Devices社ADXLシリーズの構造
おもりの側面にくし状のコンデンサが形成されており，電子回路により静電容量の変化を加速度に対応する電気信号に変換する．

1
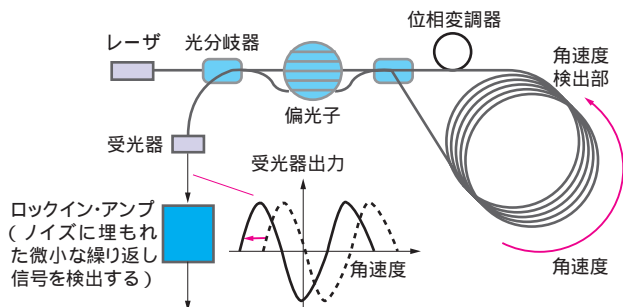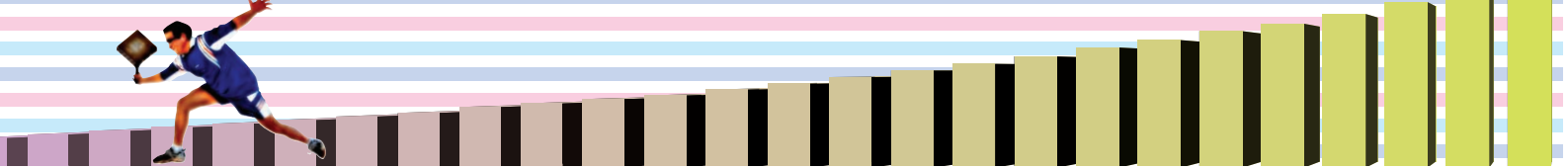
図3　サニャック効果を用いた光ファイバ・ジャイロ・センサ
リングに角速度が与えられると分離された光に光路差が生じる．その位相差により角速度を検出する．
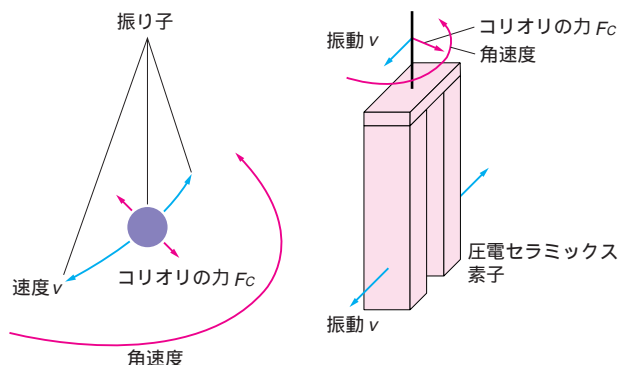
図4　角速度センサの検出原理
一定速度で振動している振り子(音さ)に外部から回転を与えると振動方向に対して垂直な方向にコリオリの力が発生する．
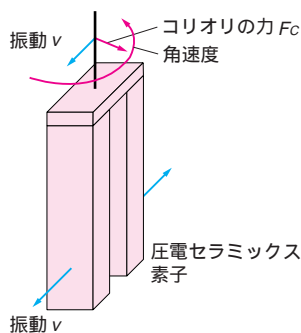
図5　圧電音さ式角速度センサの構造
音さに作用するコリオリの力を圧電素子や静電容量の変化で電気量に変換する．
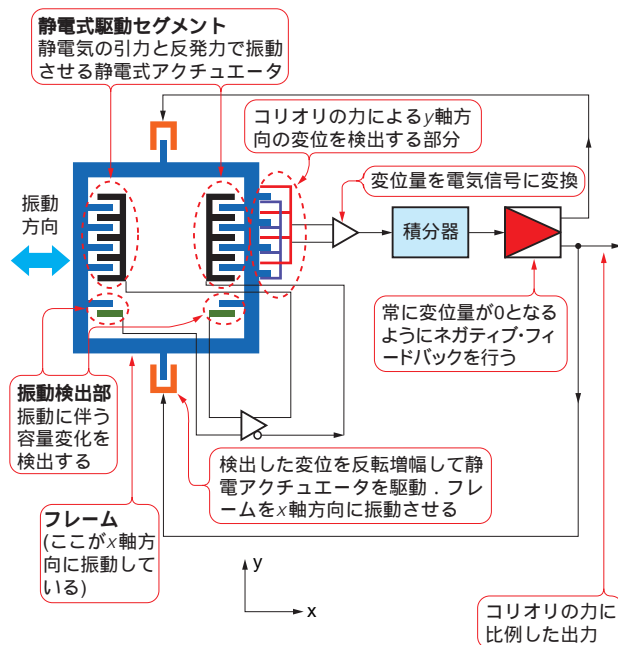
図6　Analog Devices社の加速度センサ「ADXRS150」の構造

ク効果)．光ファイバ・ジャイロは，この位相差により角速度を検出するセンサです(図3)．

少し複雑な構造ですが，機械的な駆動部分がなく，温度を一定に保てば高精度に角速度を検出することができます．ジャイロスコープはほとんど光ファイバ・ジャイロに置き換わっています．航空機の慣性誘導装置はほとんどこれを利用しています．

▶ MEMS

MEMS化されている角速度センサではコリオリの力を利用しています．図4に示すように一定速度で振動している振り子(音さ)に外部から回転を与えると音さの振動方向に対して垂直な方向にコリオリの力が発生します．回転している座標系の角速度をω，回転中心から半径rの位置にある質量mの物体の角運動量は$m\omega r^2$です．物体の振動速度vが角速度に比べて大きく，角速度が一定と見なせる場合に発生するコリオリの力F_Cは$2m\omega v$となります．

図5に示すように圧電素子や静電アクチュエータで小さな音さを作って高周波で振動させ，音さに作用するコリオリの力を圧電素子や静電容量の変化で電気量に変換することで角速度を検出します．

▶ Analog Devices社の角速度センサ「ADXRS150」の構造

Analog Devices社の角速度センサ「ADXRS150」は，ダイナミック・レンジが±160 °/sと広く，外付け部品はほとんど必要ありません．マイコンのA-Dコンバータに直結できます．

特許出願明細書(特願2001-530525)によれば，ADXRS 150には振動を発生する静電アクチュエータとコリオリの力による変位を測定する検出部に加え，変位がゼロになるようにコリオリの力を相殺するために使用される横断セグメント駆動系とフィードバック制御機構を持っています(図6)．この機構により，ほかのMEMS型角速度センサに比べてコリオリ力に比例した高い直線性を実現しています．正確な角速度の検出を広い範囲で行うことができます．

● 加速度センサと角速度センサはここが違う

加速度センサ内部のおもりは，ばねで支えられていますが，角速度センサのように一定周波数で振動していません．また，3軸加速度センサは，一つのおもりを使って各方向成分を検出できます．角速度センサは，振動方向とコリオリの力を受ける方向の2方向に直交する軸に対する回転を検出する仕組みのため，3軸で角速度を検出する場合には

振動子も3個必要になります．

現在は角速度センサの価格が加速度センサに比べて数倍の開きがあるため，応答周波数や精度には目をつぶり，3軸加速度センサの出力を基に演算を行って角速度を求める方法もあります．

● 加速度センサの使われ方

▶ 自動車のエアバッグ

エアバッグは航空機事故などの衝撃を緩和して乗員の生存率を改善する目的で，1963年に小堀保三郎氏によって考案された発明です．衝突に伴う加速度変化を検出すると，アジ化ナトリウムなどの火薬を点火させてエアバッグを0.2s～0.3s程度で瞬間的に膨張させる構造になっています（アジ化ナトリウムは人体への有毒性が問題となり，現在は使われていない）．時速72kmで走行中の自動車は1s間に20m進みます．自動車が何かに衝突すると，人体は慣性の法則によりそのまま進行方向に進み続けようとして0.1s間に2m進む計算になります．この間にエアバッグが開き終えて人体をフロント・ガラスなどから保護するには，センサの応答速度が数ms以内である必要がありました．

▶ 動作中のノート・パソコンのハード・ディスクを落下の衝撃から保護する

コンクリート床に高さ1mから落下させた場合の衝撃は1000gを超えます．この衝撃からハード・ディスク内のデータだけでも守るため，自由落下状態，つまり，加速度0の状態を検出したら，磁気ヘッドを固定して磁気記録面へのタッチダウンを回避し，磁気記録面に傷を作らないように保護する機能を実現した製品が開発されています．

▶ モーション・センサ

任天堂のゲーム機「Wii」のコントローラには，腕や手の動きを検出するモーション・センサとして，Analog Devices社の3軸加速度センサ「ADXL330」（±3g）と，ST Microelectronics社の3軸加速度センサ「LIS3L02AL」（±2g）が採用されています．

同一の機種に2社のセンサが採用されているのは，目標生産台数が非常に多いため，製造台数を分散させているためと考えられます．

人間の筋肉の応答速度は1/100秒程度なので，スポーツ系ゲームに使うにはMEMS技術を使った数百Hz以上の広帯域な特性を持つセンサが必要です．

▶ アクティブ制振技術

加速度センサは油圧や電気を使ったアクチュエータと組み合わせることで，アクティブ制振にも使われています．加速度の変化が常にゼロとなるようにネガティブ・フィードバック制御を行うことで，揺れの少ない高速水中翼船や自動車，電車，地震でも揺れない建物が実現されています．

● 角速度センサの使われ方

角速度センサは，カメラの手ぶれ補正やカー・ナビゲーション・システムの自走補正で使用されています．カメラの手ぶれ補正における使われ方の詳細は第2章（pp.74-81）に解説があります．

● 考えられる角速度センサの応用事例

▶ 低速でも転倒しない自転車

どんなに低速で走行しても転倒することがない子供や老人向けの自転車やバイクが実現する日も近いでしょう．実際，過去に電動立ち乗り二輪車Segway（別名Ginger）が開発されています．

▶ 老人向け歩行補助用のパワード・スーツ

筋力が衰えた老人の歩行をサポートするパワー・アシスト・ロボット・スーツが，筑波大学により開発されています．これに応用することで転倒事故からの保護が可能になります．

参考・引用*文献

(1)* 須藤裕司；X-Y方向の衝撃と傾きを検出する高感度半導体センサADXL202，トランジスタ技術，1999年1月号，pp.356-357，CQ出版社．
(2) LIS3L02ALデータシート，STMicroelectronics.
http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/11668.pdf
(3) ADXRS150データシート，Analog Devices.
http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADXRS150.pdf
(4) ADXL330データシート，Analog Devices.
http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADXL330_JP.pdf

うえだ・ともあき
(株)ネオテックラボ　代表取締役
東京工業大学 統合研究院

<筆者プロフィール>
上田智章． 筆者のホームページはhttp://www.neo-tech-lab.com/
追加の情報についてはホームページで紹介する予定です．

1